

위치결정 스테이지의 고속 정밀 위치결정을 위한 입력성형명령 생성 기법

Command Generation Method for High-Speed and Precise Positioning of Positioning Stage

장준원¹, 박상원¹, ✉홍성욱²
Joon-Won Jang¹, Sang-Won Park¹ and ✉ Seong-Wook Hong²

¹ 금오공과대학교 기전공학과 (Department of Mechatronics, Kumoh National Institute of Technology)

² 금오공과대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

✉ Corresponding author: swhong@kumoh.ac.kr, Tel: 054-478-7344

Manuscript received: 2008.2.5 / Revised: 2008.4.13, 6.11 / Accepted: 2008.7.4

This paper deals with precise positioning of a high-speed positioning stage without inducing residual vibration by using an input shaping technique. Input shaping is well known to be a very effective tool for suppressing the residual vibration of flexible structures. However, the ordinary input shaping for positioning stages is designated mostly for velocity regulation, not for the residual vibration at the target position. The main difficulties in implementing input shaping along with precise positioning are the time delay caused by the servo system characteristics and the s-curve feature often employed in some motor controllers. This paper analyzes the dynamic responses of a single-mode-dominant stage system subjected to input shaping. A theoretical model is developed to investigate the nature of system. In order to overcome the difficulty, this paper proposes an improved input shaper based on modified command profile generation. The proposed method is proved effective through experiments and simulations.

Key Words: Input Shaping(입력성형), Positioning Stage(위치결정 스테이지), Residual Vibration(잔류진동), Precise Positioning(정밀위치결정)

1. 서론

서보 시스템으로 구성된 XY 스테이지는 고속 정밀 위치결정이 요구되는 많은 분야, 예컨대 반도체 및 LCD 등의 제조 공정에서 널리 사용되고 있다. 이러한 XY 스테이지에 대해 최근에는 고속 정밀 위치결정에 대한 요구가 증가하고 있어 이송 시스템이 가지는 기계적인 한계를 극복해야 하는 상황이 많이 발생되고 있다.¹⁻⁵ 이송계의 속도를

높이기 위해서는 구조물을 경량화 하는 것이 바람직하나 진동에 취약해지게 되고 이는 정밀도나 작업 속도를 떨어뜨리는 결과가 된다.⁶ 특히 문제가 되는 부분은 출발, 정지 등 과도상태에서 발생하는 잔류 진동이다. 입력성형기법(Input Shaping Method)은 이와 같은 잔류진동 제거에 매우 효과적인 것으로 잘 알려져 있다.⁷⁻¹² 그러나 입력성형 기법은 진동 저감효과에 주로 초점이 맞춰져 있어 스테이지의 위치결정 정밀도에 대한 특성을 논의

한 연구는 많지 않았다. 일반적으로 이송계를 원하는 경로로 단순 이송하면 최종 목표지점에서의 가감속에 의해 야기되는 잔류진동으로 인하여 위치 안정화 시간을 필요로 하거나 정밀한 위치결정이 어렵게 된다. 이러한 이유로 최근에는 입력성형기법을 이용하여 이송 중 또는 정지 시 발생하는 잔류진동을 제거하면서 정밀 위치결정을 할 수 있는 입력명령 생성 방법에 대해 연구되고 있다.

스테이지 이송경로가 미리 결정되어 있는 경우, 이송명령에 입력성형기(Input Shaper)를 컨벌루션(Convolution)하여 얻어지는 수정된 명령을 스테이지에 인가할 수 있도록 함으로써 입력성형기법을 구현할 수 있다. 그러나 준폐루프 상태로 상업용 모션 컨트롤러를 이용하여 위치결정 작업을 할 때에는, 진동 양상이 가속구간(Acceleration Period)과 감속구간(Deceleration Period)에서 상이하게 나타나는 경우가 많이 있어 입력성형기법 적용 효과가 나빠지는 경향이 있다. 이것은 시스템이 가지는 시간지연 및 감속 시 적용되는 필터 효과로 인해 가속구간과 감속 구간에서 동일한 명령 특성을 가질 수 없기 때문이다. 이와 같은 서보계의 특성을 무시하고 입력성형기를 설계하여 적용할 경우 목표지점에서 잔류진동을 효과적으로 제거할 수 없다.

본 논문에서는 준폐루프 시스템에서 상업용 모션 컨트롤러를 이용한 위치결정 작업 중 가속구간과 감속구간에서 발생하는 진동 특성을 파악하고, 목표지점에서의 잔류진동을 효과적으로 제거할 수 있는 방법을 제안하고 검증하였다.

2. 실험장치

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 실험 장치에 대해 나타낸 것이다. 실험 장치의 구성은 산업 전반에서 위치결정 스테이지(Positioning Stage)로 널리 사용되고 있는 XY 스테이지와 각 축을 구동하기 위한 서보모터 그리고 LM 가이드 등으로 구성되어 있다. 또한 XY 스테이지의 작업 테이블에는 실제 작업 조건을 근사화하기 위해 적당한 질량이 부착되어 있다. 본 연구에 사용된 질량은 10kg 이다. XY 스테이지는 석정반위에 고정되어 있으며 모션 컨트롤러는 DSP 보드를 사용하였다. 또한 모션에 관련된 데이터 및 모든 제어 변수(속도, 가속도, 위치 등)를 실시간으로 수정하고, 모니터링

할 수 있도록 소프트웨어를 개발하였다. Fig. 2 는 본 연구에 사용된 시스템에 대한 개략도이다.



Fig. 1 Experimental apparatus

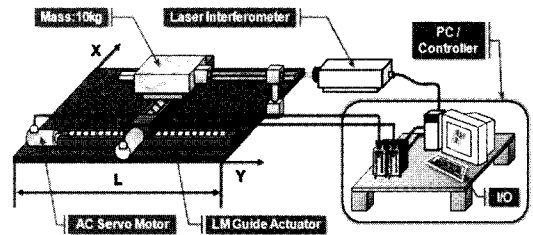


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

3. 입력성형기법에서의 위치결정

3.1 위치결정을 위한 입력성형기법

서보계에 속도명령을 주고 그 명령에 의한 이론적인 이동거리 S 는 속도명령 프로파일을 이용하여 아래 식(1)에 의해 계산될 수 있다.

$$S = \int_{t_i}^{t_f} v(t)dt \quad (1)$$

여기에서 $v(t)$ 는 시간에 따른 이송속도명령을 나타내고, t_i, t_f 는 각각 위치결정의 시작 시간과 종료 시간을 의미한다. 본 논문에서는 위치결정 시작 시간 t_i 를 0으로 두었다. 주어진 이송속도명령에 입력성형기를 컨벌루션하게 되면 수정명령(Modified Command)을 생성할 수 있으며, 수정명령에 의한 위치결정의 종료 시간은 변경되지만 식(1)을 통해 계산되어지는 이론적인 이동거리는 Fig. 3에서 보여지는 것과 같이 동일하다.

입력성형기에 의해 수정명령을 생성하기 위해 필요한 요소들은 기존 이송속도명령의 속도, 가속도, 감속시간, 이동거리 그리고 컨벌루션을 위한 입력성형기의 임펄스 크기(Impulse Magnitude)와 임펄스 사이의 시간간격 등이다. Fig. 3은 입력성

형기 중 ZV(Zero Vibration)⁷ 성형기를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우의 위치결정을 위한 기준 이송속도와 수정된 속도 프로파일을 나타낸 것이다.

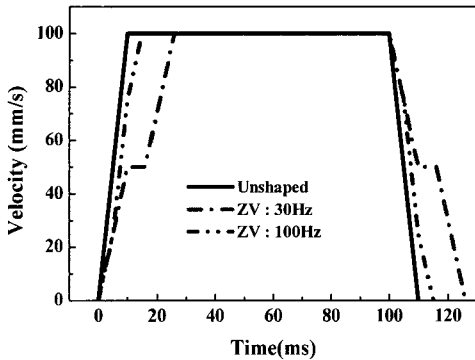
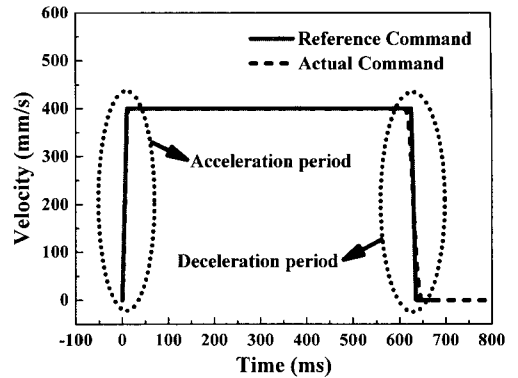
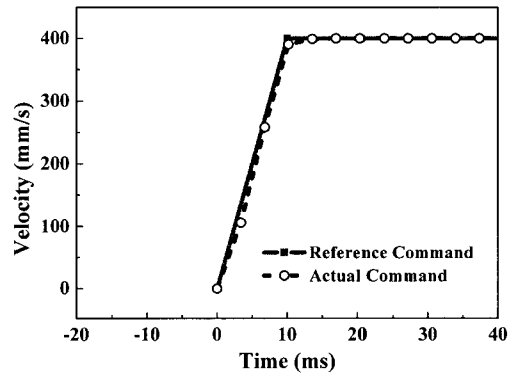


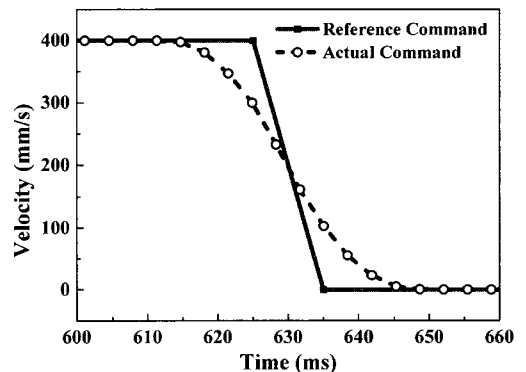
Fig. 3 Comparison of the velocity profiles for unshaped and shaped commands



(a) Reference and actual commands

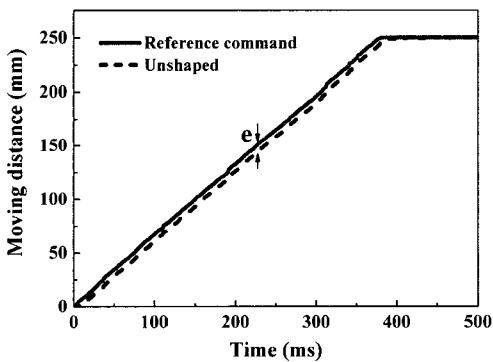


(b) Acceleration period

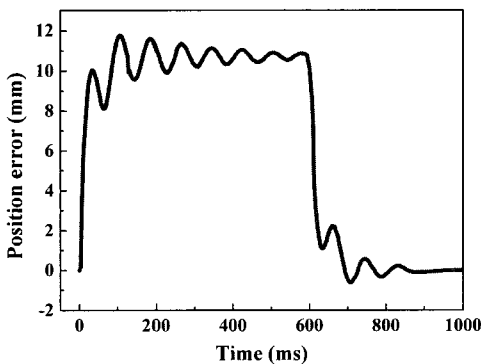


(c) Deceleration period

Fig. 5 Comparison of the velocity profiles for reference and actual commands without input shaper



(a) Moving distance



(b) Position Error

Fig. 4 Moving distance and position error without input shaping

사용된 ZV 성형기는 비교를 위해 고유 진동수가 30Hz 와 100Hz 인 두가지 경우에 대해 설계되었다. Fig. 3 에서 보여지는 것과 같이 입력성형기

법을 적용하기 전과 후의 속도 프로파일의 모양에는 다소 차이가 있지만 속도 프로파일로 둘러싸인 면적으로 계산된 이동거리는 동일하다.

본 논문에서는 ZV 성형기를 이용한 입력성형기법 적용 시 속도 프로파일을 총 일곱 개의 시간구간으로 구분 하였으며, 각 구간별 이동거리를 이용하여 전체 위치결정을 위한 이동거리를 계산하였다. 본 논문에서 사용된 시간구간은 기준명령에 대해 입력성형기를 컨벌루션한 결과로부터 얻을 수 있다. 그리고 계산된 각 구간에 대해 룩업 테이블(Look-Up Table)을 생성하여 실제 위치 결정 작업을 위해 사용하였다. 이렇게 함으로써 각 구간별 명령 실행으로 인한 시간지연(Time Delay) 현상을 무시할 수 있다.

3.2 위치오차 측정

Fig. 4(a)는 입력성형기법을 적용하지 않은 경우에 위치결정을 위해 사용된 기준명령과 실제 XY 스테이지의 위치 응답을 이용해 계산된 이동거리를 나타낸 것이다. 기준명령에 의한 이동거리는 실선으로 나타내었고, XY 스테이지의 위치 응답에 의한 실제 이동거리는 점선으로 나타내었다. XY 스테이지의 위치 응답을 획득하기 위해 본 논문에서는 서보모터의 엔코더 신호를 이용하였으며, 총 이동거리는 250mm 이다. 기준명령에 의해 계산된 위치와 실제 이동위치의 차이를 Fig. 4(a)와 같이 위치 오차(e)로 표시하였다. Fig. 4(b)는 입력성형기법을 사용하지 않은 경우에 XY 스테이지의 위치 결정 작업으로 발생한 위치 오차를 시간에 대해 나타낸 것이며, 가속구간(Acceleration Period)과 감속 구간(Deceleration Period)의 위치오차 응답이 동일하지 않음을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 사용된 상업용 모션 컨트롤러에 의해 생성된 실제 입력명령이 가속구간과 감속구간에서 동일하지 않기 때문이다.

Fig. 5 는 위치결정 작업을 위해 생성된 이론적인 기준명령과 본 논문에서 사용된 상업용 모션 컨트롤러에 의해 실제로 서보계에 입력되는 위치 결정 명령을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 가속구간 및 감속구간에서의 이론적인 명령과 실제 서보계에 입력된 명령을 나타낸 것이다. 또한, 각 구간에서의 명령 특성을 비교 해보기 위하여 Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)에서 가속 및 감속구간의 상세한 명령 형태를 나타내었다. Fig. 5(b)에서 보이는 것처럼 가속

Table 1 Input shaping parameters for ZV shaper

Natural Frequency	12.46 Hz
Velocity	400mm/s
Acceleration Time	10ms
Deceleration Time	10ms
A_1 / A_2	0.5 / 0.5

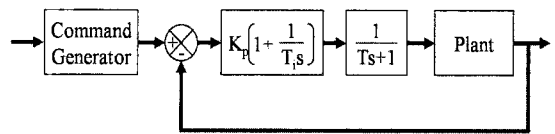


Fig. 6 Block diagram of a generic control system

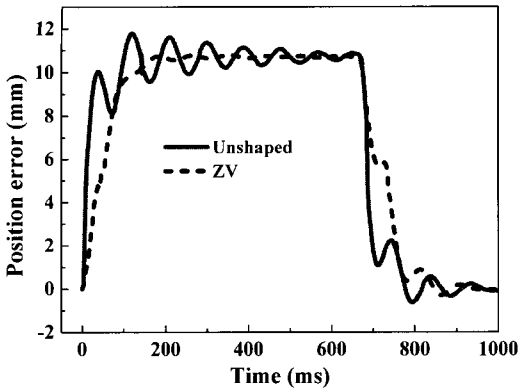
구간에서는 위치결정을 위한 이론적인 명령과 실제 서보계에 입력되는 명령이 유사한 형태를 가지는 반면, 감속구간에서는 Fig. 5(c)에서 보이는 것과 같이 이론적인 명령이 서보계에 입력된 후 필터링 되어 다른 형태를 가짐을 알 수 있다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구에 사용된 상업용 모션 컨트롤러에서 위치결정을 위해 생성한 감속구간의 명령은 S-곡선 명령 형태를 가진다. 준폐루프 시스템에서 상업용 모션 컨트롤러를 이용하여 위치결정 작업을 할 경우 Fig. 5 와 같이 위치결정을 위해 서보계에 입력되는 실제 입력이 가속구간과 감속구간에서 동일하지 않으므로 인해 Fig. 4 와 같은 진동 특성을 가지게 된다. 또한, 감속 구간에서의 진동 특성은 상업용 모션 컨트롤러에서 미리 설정되어 있는 S-곡선 특성에 의해 실제 입력이 변형되는 것에 영향을 많이 받는다.

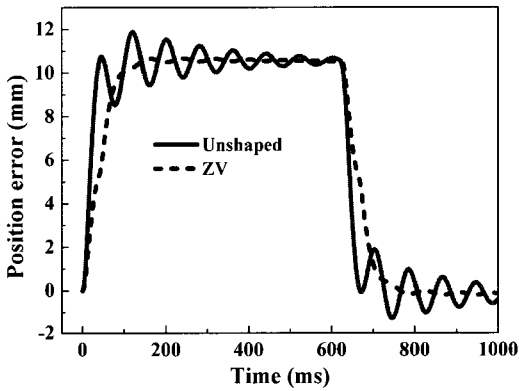
4. 입력성형기법 적용 및 결과

4.1 입력성형기법 적용

본 논문에서는 위치 결정 작업시 발생하는 시스템의 잔류진동을 제거하기 위해 ZV 성형기를 사용하였으며, 입력성형기를 통한 수정 명령을 생성하기 위해 사용된 인자들은 Table 1 과 같다. 또한, 서보계의 제어 방식은 준폐루프 방식이다. 그리고 본 논문에서 사용된 시스템을 시뮬레이션 하기 위해 사용된 블록 다이어그램(Block Diagram)은 Fig. 6 과 같다.



(a) Experiment results



(b) Simulation results

Fig. 7 Comparison of the experiment and simulation results

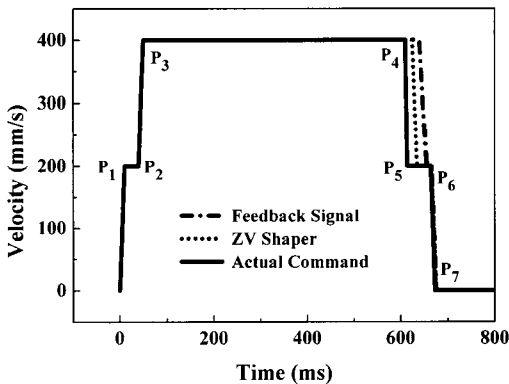


Fig. 8 Comparison of the velocity profiles for reference and actual command with ZV

Fig. 7 은 이송 시 발생하는 시스템의 잔류진동과 입력성형기를 이용하여 시스템의 잔류진동을

제거한 결과에 대해 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 실제 명령 프로파일이 감속구간에서 S-곡선 명령을 가지는 경우 XY 스테이지 실험 결과이다. 실선으로 표시된 것은 입력성형기를 적용하지 않은 경우이고, 점선으로 표시된 부분이 입력성형기를 적용한 경우이다. 가속구간 이후에 잔류진동은 효과적으로 제거 되지만, 감속구간에서는 만족할 만큼의 잔류진동 제거 효과를 보여주지 못한다. 특히, 목표지점에서는 입력성형기에 의한 잔류진동 제거 효과는 거의 없는 수준이다. 이것은 상업용 모션 컨트롤러에서 감속구간의 속도 프로파일이 S-곡선 형태로 수정되었기 때문이며, 여기서 S-곡선의 속도 프로파일은 시스템의 특성을 고려하지 않고 생성된 것이다.

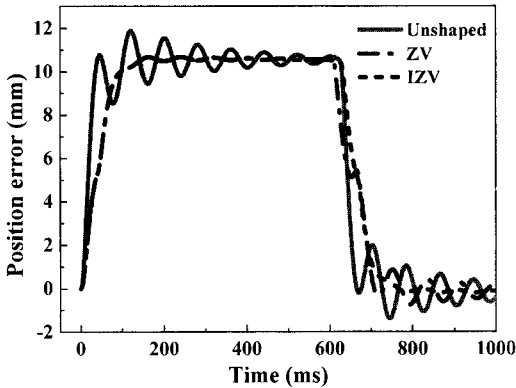
Fig. 7(b)는 감속구간의 명령 프로파일을 기준 명령 그대로 적용하기 위하여 동일한 동작을 계산한 시뮬레이션 결과이다. 점선으로 표시된 입력성형기를 적용한 경우에 가속구간뿐만 아니라 감속구간, 특히 목표지점에서의 잔류진동이 효과적으로 제거됨을 알 수 있다.

Fig. 7 의 실험 및 시뮬레이션 결과로부터 입력성형기가 S-곡선 명령에 비해 시스템의 잔류진동을 효과적으로 제거함을 알 수 있다.

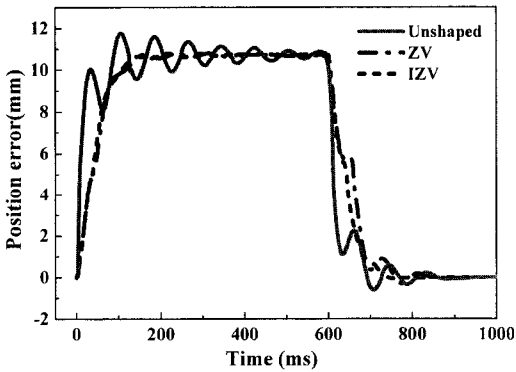
4.2 개선된 입력성형기법 적용

본 논문에서는 서보계의 시간지연으로 발생하는 특성과 사용된 모션 컨트롤러의 감속구간 S-곡선 명령 특성을 고려하여 기존 입력성형기를 개선한 입력성형기법(IZV; Improved ZV input shaping)을 제안하였다. 개선된 입력성형기법은 위치결정 작업을 위해 입력된 최초의 기준명령에 필터링 특성(S-곡선 등)을 고려하여 목표지점에서 잔류진동이 효과적으로 제거될 수 있도록 감속구간에서의 명령을 수정하는 것이다.

Fig. 8 의 점선과 같이 계산되어진 기존 ZV 성형기를 이용하여 XY 스테이지를 구동하더라도 서보계의 시간지연 및 감속구간의 특성으로 인하여 실제 XY 스테이지의 구동은 Fig. 8 에 나타나는 일점쇄선과 같이 입력명령과 상이한 형태를 보여주고 있다. 이러한 감속구간의 특성을 개선하기 위해 개선된 입력성형기법을 도입하였다. 이는 Fig. 8 의 실선과 같이 감속구간에서의 상이한 부분을 보상해 줄 수 있는 P₄ 와 P₅ 를 가진 명령 프로파일이다.



(a) Simulation results



(b) Experimental results

Fig. 9 Comparison of position errors with ZV, improved ZV and without input shaping

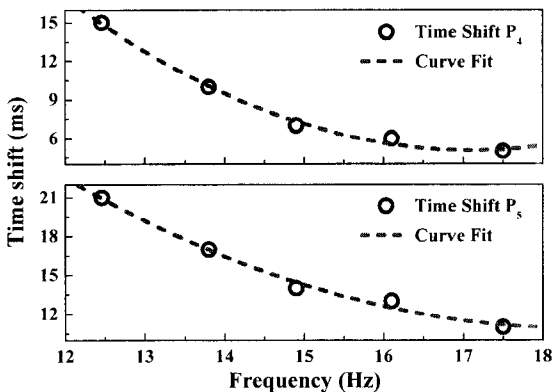


Fig. 10 Estimated P_4 and P_5 with the natural frequency varied

본 실험에서 사용된 P_4 와 P_5 의 보상치는 기존 ZV 성형기를 이용하여 생성된 명령 프로파일을

기준으로 각각 $-15ms$, $-21ms$ 이다. 이는 서보계의 특성으로 인하여 지연된 감속구간에서의 명령 프로파일을 보상해 줄 수 있도록 실험적으로 획득된 값이다. 이렇게 생성된 실제 명령 프로파일을 이용하여 XY 스테이지를 기존 ZV 성형기를 이용한 동일한 명령 프로파일 형태로 구동하였다. 여기에서 실제 명령(Actual Command)은 모션 컨트롤러에서 서브 드라이브로 입력되는 명령이다.

Fig. 9 는 개선된 입력성형기법에 대한 시뮬레이션과 실험 결과에 대해 나타내었다. Fig. 9(a)에 보이는 바와 같이 개선된 입력성형기법에 의한 감속 구간에서의 시뮬레이션 결과는 기존 입력성형기법에 비해 잔류진동 제거에 효과적이며, 실제 시스템에 대해 적용 결과를 보여주는 Fig. 9(b)에서도 점선으로 표시된 개선된 입력성형기법이 감속 구간, 특히 목표지점에서의 잔류진동 제거에 효과적임을 알 수 있다.

시스템의 고유진동수 변화에 따라 개선된 성형기를 설계하기 위해 본 논문에서는 실험을 통하여 보상치를 계산하였으며, Fig. 10 은 이것에 대한 결과를 나타낸 것이다. 이렇게 얻어진 결과를 바탕으로 다양한 고유진동수 영역에 대해 계산을 할 수 있었으며, 모든 영역에서 가속 및 감속구간에 동일한 입력성형기를 적용한 기존의 입력성형기법보다 개선된 입력성형기법을 적용한 경우가 목표지점에서의 잔류진동이 더 효과적으로 제거됨을 알 수 있다.

이와 같은 결과들을 바탕으로 위치결정 작업 중, 특히 목표지점에서 발생하는 잔류진동을 효과적으로 제거할 수 있는 개선된 입력성형기를 설계할 수 있었으며 개선된 입력성형명령을 통해 목표지점에서의 잔류진동을 제거함으로써 위치결정 완료 시간을 단축시켜 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

5. 결론

본 연구는 위치결정 스테이지의 고속 정밀 위치결정을 위한 입력성형명령 생성 기법에 대해 연구하였다. 먼저, 이동경로가 정해진 위치결정 동작을 위한 록업 테이블을 생성하였으며, 고유진동수의 변화에 따라 자동으로 입력성형기에 의한 수정명령을 생성할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

또한, 서보계의 시간지연 및 감속구간에서의

상이한 명령 특성으로 인해 가속 및 감속구간에서 동일한 입력성형기를 이용한 입력성형기법은 목표 지점에서의 잔류진동을 효과적으로 제거할 수 없음을 확인하였고, 이를 개선하기 위해 서보계의 시간지연 특성 및 감속 시 발생하는 S-곡선 명령 특성을 고려하여 개선된 입력성형기를 이용한 입력성형명령 생성 기법을 제안하였다. 이러한 방법을 통해 목표지점에서의 잔류진동을 효과적으로 제거하였으며, 위치결정을 위한 모든 고유진동수에 대해 대응할 수 있는 입력성형기를 설계하는 방법을 제안하였다.

후 기

본 연구는 2007 년도 구미 전자 산업 진흥원에서 “지역 밀착형 산학 협력 촉진 사업” 소재·부품·모듈 핵심 기술 연구 개발 사업의 지원 하에 수행 되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Dijkstra, B. G., Rambaratsingh, N. J., Scherer, C. W., Bosgra, O. H., Steinbuch, M. and Kerssemakers, S., “Input Design for Optimal Discrete Time Point-To-Point Motion of an Industrial XY-Positioning Table,” Selected Topics in Signals, Systems and Control, Vol. 12, pp. 9-14, 2001.
2. Park, C. H. and Lee, H. S., “Precision Positioning Technologies with Ball Screw,” J. of the KSPE, Vol. 17, No. 12, pp. 26-33, 2000.
3. Tseng, Y. T. and Liu, J. H., “High-speed and Precise Positioning an X-Y Table,” Control Engineering Practice, Vol. 11, No. 4, pp. 357-365, 2003.
4. Kwac, L. K., Kim, J. Y., Yang, D. J., Ko, M. S., You, S. and Kim, K. T., “Optimal Design of Controller for Ultra-Precision Plane X-Y Stage,” Proc. of the KSPE Spring Conference, pp. 342-347, 2002.
5. Song, W. K., Choi, W. C., Cho, D. W. and Lee, E. S., “Precision Position Control of Feed Drives,” Proc. of the KSPE Fall Conference, pp. 266-272, 1995.
6. Lee, C. H., “Ultraprecision Positioning Technology,” J. of the KSPE, Vol. 17, No. 12, pp. 9-15, 2000.
7. Singhose, W. and Seering, W., “Command Generation for Dynamic Systems,” Lulu.com, 2007.

8. Chang, P. H. and Park, J., “A Concurrent Design of Input Shaping Technique and a Robust Control for High-speed / High-precision Control of a Chip Mounter,” Control Engineering Practice 9, pp. 1279-1285, 2001.
9. Lau, M. A. and Pao, L. Y., “Input Shaping and Time-optimal Control of Flexible Structures,” Automatica 39, pp. 893-900, 2003.
10. Bodson, M., “An Adaptive Algorithm for the Tuning of Two Input Shaping Methods,” Proc. of the American Control Conference, pp. 1340-1344, 1997.
11. Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S. and Singhose, W., “Discretization Effects of Real-Time Input Shaping in Residual Vibration Reduction for Precise XY Stage,” Trans. of the KSMTE, Vol. 16, No. 4, pp. 71-78, 2007.
12. Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S. and Singhose, W., “A Study on Dynamic Performance of Precise XY Stages Using Real-Time Input Shaping,” Proc. of the 8th ISMTII, 2007.

부록

A1. 입력성형기법

입력성형기법이란 속도의 가속 및 감속 방법을 한 단계로 실행하는 것이 아니라 입출력 특성에 근거하여 여러 단계로 나눔으로써 자체의 입력에 의한 진동 상쇄 효과를 얻을 수 있도록 하는 것이다.

Fig. A1 은 임펄스 A1 의 응답에 임펄스 A2 의 응답을 합성함으로써 전체 응답이 A2 가 입력된 이후에 상쇄되는 것을 알 수 있다. 이처럼 입력성형기법의 원리는 초기 입력에 의해 나타나는 진동을 적절한 시간지연 후에 적절한 크기의 입력을 가함으로써 진동을 상쇄시키는 것이다. 여기서 가장 중요한 것은 두 번째 입력의 크기와 시간인데, 이는 시스템이 갖는 고유진동수와 감쇠에 의해 다음과 같은 식으로부터 계산된다.⁷

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1+K & T/2 \\ 0 & T/2 \end{bmatrix} \tag{A1}$$

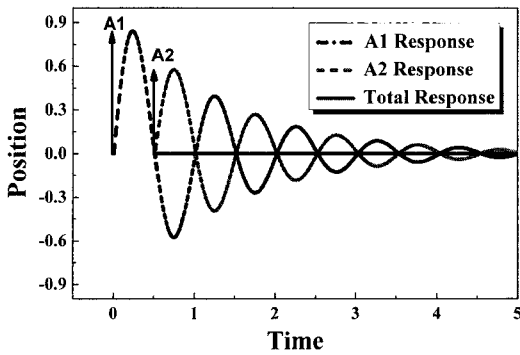


Fig. A1 Vibration elimination with input shaping

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2K & K^2 \\ (1+K)^2 & (1+K)^2 & (1+K)^2 \\ 0 & T/2 & T \end{bmatrix} \quad (A2)$$

ZVD 를 이용하면 ZV 보다 계산에 사용된 고유진동수 및 감쇠비 오차에 둔감한 것으로 알려져 있다.⁷

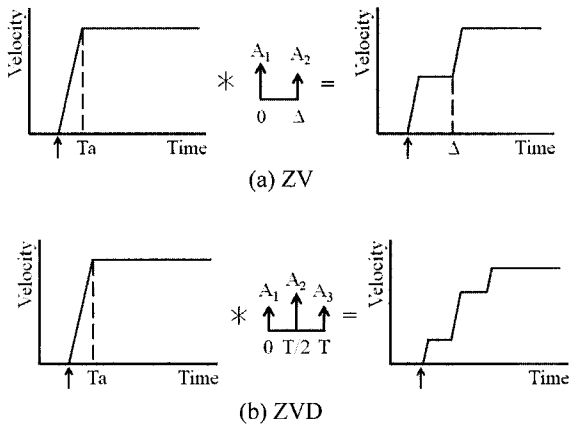


Fig. A2 ZV and ZVD input shaping

여기서,

$$K = e^{\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right)}$$

또한 T 는 고유진동수에 의한 진동주기를, ζ 는 감쇠비를 의미한다.

본 연구에서는 입력성형기법을 적용하지 않은 상태에서의 위치결정 스테이지 구동을 통하여 얻어진 위치오차 응답을 이용하여 고유진동수와 감쇠를 결정하였다.

한편 ZVD(Zero Vibration Derivative) 입력성형기는 Fig. A2(b)와 같이 A_1, A_2, A_3 크기의 임펄스를 각각 $0, T/2, T$ 만큼의 간격으로 컨벌루션하는 것이다. 여기서 임펄스의 크기와 시간은 다음 식을 통해 계산된다.